

# トラス模型を用いた載荷試験による 教育訓練の事例報告

関東職業能力開発大学校 古山 辰志

Case Report on Education and Training by Loading Tests Using Truss Models

KOYAMA Tatsushi

**要約** 構造分野への興味関心を抱かせるために多方面で様々な工夫がなされている。筆者が所属する建築科では、一定の条件を与えて班毎に異なる形状のトラス模型を製作させ、定めた荷重条件に対して応力計算をさせた上で載荷試験を実施する授業展開を数年に渡って試みてきた。載荷試験では、所定の部材にひずみゲージを貼り付け、部材の応力を実験データとして可視化することで、構造力学の学科だけでは実感しづらい応力等について学生の理解を促進し、構造物の強度に対する興味を喚起させるように工夫を施した。本報では、当科で実施する実習を題材に取り上げ、初学者が構造分野に興味関心を示した教育訓練の事例について報告する。

## I はじめに

自分が作ったものが強いのか、弱いのか。建築に限らず、ものづくりに関わる者ならば関心を示すべき事項の一つに挙げても良いだろう。他方で、外力に対して構造物に生じる力は目に見えないため、初学者にとっては実感しづらく、構造分野に関する科目を苦手とする学生は他の分野に比べて多いのが実情だろうと捉えている。そこで、筆者が所属する建築科では、一定の条件を与えて構造物を製作させ、定めた荷重条件に対して応力計算をさせた上で、載荷試験を実施する授業展開を数年に渡って試みてきた。こうした取り組みは他の教育機関でも広く実施されており、それぞれの創意工夫がインターネット上でも確認することができる。パスタブリッジ<sup>①</sup>を用いて用・強・美を競い合うコンテストを授業カリキュラムに取り入れている事例はその最たるものの一つであろう。その他、紙模型梁強度コンテスト<sup>②</sup>などいくつかの事例を目にするが、いずれの事例も構造物の強度に対する興味を喚起させており、参加者から高評価を得ているようである。本事例では、これらの事例をさらに発展させ、部材に生じる力（以下、応力という）を実験データとして可視化し、構造力学の学科だけでは実感しづらい応力等について学生の理解を促進するように工夫を施した。そ

の結果、学生からは次のような声が集まった。

- ・学科と実習のつながりを実感できた。
- ・自分で作ったものの強度が知れて楽しく学べた。
- ・似たような構造でも強度や壊れ方が違うことを知ることができ興味が沸いた。
- ・トラスへの関心が高まった。
- ・もっと良い結果を出したい。
- ・実際にやってみることで座学では得られないものを学べた。
- ・計算と試験結果の比較により力学への関心が高まった。
- ・この先何をどう学ぶかについて考えるきっかけになった。

こうした声に直に触れられることは授業担当者冥利に尽きるが、カリキュラム一辺倒の授業実施だけではこれらの声を集めることは難しかったであろうと感じている。

本報では、上記の声が集まった当科の実習の一つを取り上げ、これに現状の課題及び今後の展望を踏まえた考察を加えて、初学者が構造分野に興味関心を示した教育訓練の事例について報告する。

## II 実習概要

本事例は、基礎工学実験（4単位）の2単位分を集中実習で実施したものである。

実習では、班単位（4班制）でトラス模型を1体製作し、載荷試験により各部材に生じる応力の種類を確認する。試験前には部材に生じる応力を計算で求めておき、試験結果との比較を行う。これらを通じて構造力学で学ぶ計算に関する理解を深めること、載荷試験に必要な各種機器の扱い方に慣れさせることを主なねらいとする。

## III 課題提示

図1は株式会社トーセン（栃木県矢板市山田67番地）の敷地内にある木造トラス構造による製材場である。木材を製材するための機器を配備する関係上、建屋内を無柱空間にしなければならないことから、木造トラス構造が採用されている。トラスは小断面かつ少ない部材数で大スパン空間を形成できる利点があるが、実例の提示は初学者に限らず説得力を有する教材となり得る。授業では、これを力学モデル（図2）で表し、部材に軸力のみが作用するように荷重条件を与え、応力計算の手順から説明する。ここでいう軸力とは引張力と圧縮力を指すが、引張力を+（プラス）、圧縮力を-（マイナス）で扱うように説明することで、後に出てくるひずみゲージの取り扱いと関連付けている。

以上の手順を踏んだ後、学生には次のように課題を提示する。

- ① トラスの部材に生じる応力の種類（引張、圧縮）を明らかにすること。
- ② 応力計算したトラスの模型を製作すること。
- ③ 製作した模型を用いて載荷試験を行い、①の結果と比較すること。



図1 木造トラス構造による建屋

## IV 事前計算（トラスの応力計算）

実習では、図1の実例を力学モデル（図2）に置換し、部材A、B、Cに生じる応力の種類（引張、圧縮）と大きさを明らかにするための計算方法を説明する。

トラスの応力計算は節点法、切断法、図式解法（クレモナ法）の3つが知られているが、ここでは節点法を用いて説明し、三角関数の理解を確認しながら取り組む。模型自体の自重は無視するものとし、部材に軸力のみが作用するようにh点に集中荷重を作用させる。表1はトラス部材に作用する応力を整理したものである。なお、本モデルは左右対称であることから左半分のみを計算表示とする。

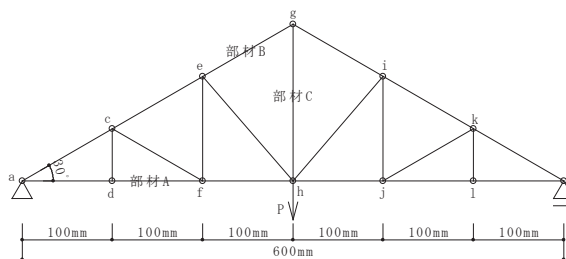


図2 トラスの力学モデル

表1 部材に作用する応力の一覧

部材名	応力	
	値	種類
ac	-P	圧縮
ad	$+\sqrt{3}P/2$	引張
df (A)	$+\sqrt{3}P/2$	引張
cd	0	
cf	0	
ce	-P	圧縮
ef	0	
fh	$+\sqrt{3}P/2$	引張
eg (B)	-P	圧縮
eh	0	
gh (C)	+P	引張

## V トラスの模型製作

### 1 トラスの形状決定

トラスの形状は構造力学で使用する教科書<sup>④</sup>から選定し、班毎に割り振る（図3～図6）。

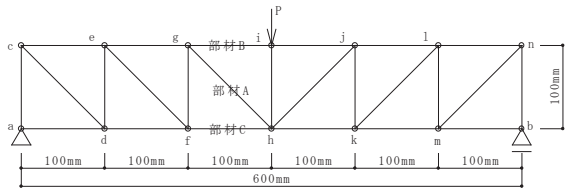


図3 平行弦トラス(1班)

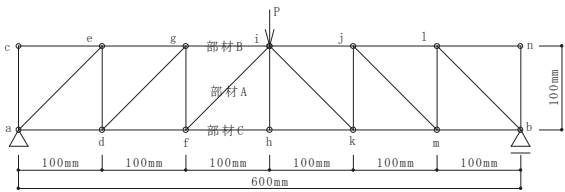


図4 平行弦トラス(2班)

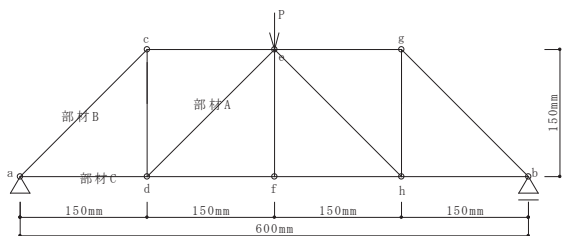


図5 台形トラス(3班)

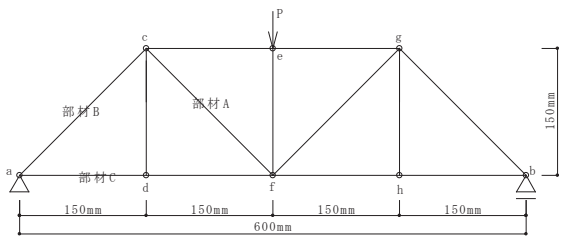


図6 台形トラス(4班)

## 2 使用材料と工具

模型製作に使用する材料、工具類を表2に示す。

表2 模型製作に使用する材料と工具

No.	品名	用途
①	スチレンボード厚3mm	トラス部材
②	スチレンボード厚5mm	トラス部材
③	ケント紙	接合部の補強
④	発泡素材用接着剤	部材の接着
⑤	定規	部材加工
⑥	カッター	①、②の切断
⑦	カッター用マット	作業台の保護
⑧	ドラフティングテープ	接着時の固定

## 3 製作条件

与条件は次の4つとする。

- ① トラスの計画図(図3~図6)を基に班で一体を製作すること。
- ② 部材は全て幅30mm×成10mmの矩形断面とすること(図7)。
- ③ 接着は発泡素材用接着剤を使用すること。
- ④ 製作した模型は自立すること。

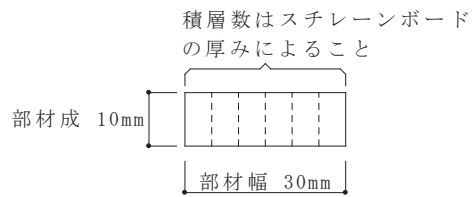


図7 部材断面の製作例

## 4 製作方法

トラスは部材同士が角度をもって取りつくため、組立時に精度が得られにくい。本事例では、図3~6に示すトラスに部材成を入れた原寸図を作成し、図面上に部材を置いて模型を製作する。

## VI 载荷試験

### 1 使用機器と構成

载荷試験は表3の機器を組み合わせて実施する。図8に機器の構成を示す。

表3 载荷試験で使用する機器一覧

No	機器名	備考欄
1	自動载荷装置	株式会社マルイ ミハエリス曲げ試験機
2	鉛玉	φ2mm
3	データロガー	株式会社東京測器研究所 TDS-540
4	ロードセル	株式会社東京測器研究所 TCLZ-500NA
5	変位計	株式会社東京測器研究所 CDP-100
6	ひずみゲージ	株式会社東京測器研究所 FLAB-3-11-5LJCT-F
7	パソコン	荷重値と変位の計測記録
8	静的計測ソフトウェア	株式会社東京測器研究所 TDS-7130 Visual Log
9	はかり	AND HV-60KGL

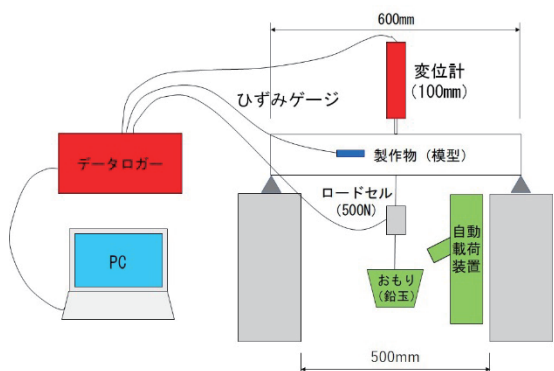


図8 載荷試験に用いる機器の構成

## 2 試験方法

トラス模型の支点間距離は 600 mm とし、中央部にロードセルと容器を設置する。この容器に自動載荷装置 (図9) を用いて一定の速度 (50±10 N/s) でφ2mm の鉛玉を投入し、これを荷重値としてロードセルで計測する。自動載荷装置は、底部にストップレバーがあり、容器がこれに触れると載荷が自動的に止まる仕組みである。

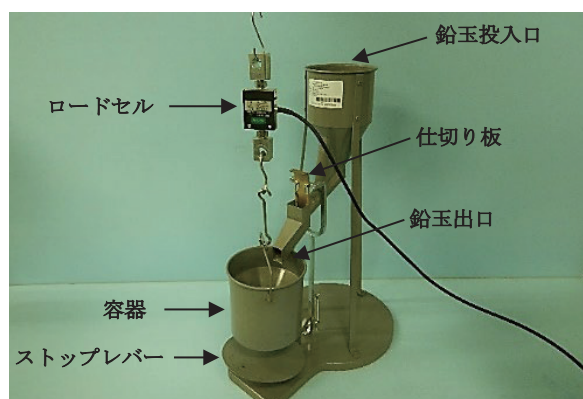


図9 ミハエリス曲げ試験機に付属する自動載荷装置

変位は模型上部に設置する変位計で計測する。荷重と変位の関係 (以下、荷重変位曲線という) をパソコン上で表せば、載荷試験をしながら模型の状態変化を確認することができる。

その他、部材 A、B、C の中央部にはひずみゲージを貼り付ける。貼り付ける面は部材成とする。ひずみゲージは引張が作用した場合は+ (プラス)、圧縮が作用した場合は- (マイナス) を計測表示することができるため、この特性を用いて計算結果を手元に置きながら載荷試験による実現象を確認することができる。

## 3 試験結果

本事例では、4 班分の模型を載荷試験した。図 10 に荷重変位曲線を示す。

荷重と変位に囲まれた面積の大きさより、2 班の平行弦トラス (図4) が最も粘り強いことが分かる。次に3 班の台形トラス (図5) が続く。トラスの形状は違うが、いずれも斜材部がハの字の形状であることが分かる。1 班の平行弦トラス (図3) と4 班の台形トラス (図6) はいずれも斜材部が逆ハの字の形状で、2 班と3 班に比べると強度が半分にも満たない結果となった。斜材部が逆ハの字の部材には引張力が作用するため、接合部の強度が重要になってくるが、本事例では載荷中に接合部が破損する様子が確認されており、これが要因の一つとして考えられる。

表4 は、事前計算と試験結果を比較したものであるが、いずれの班も応力の種類が合致する結果となった。

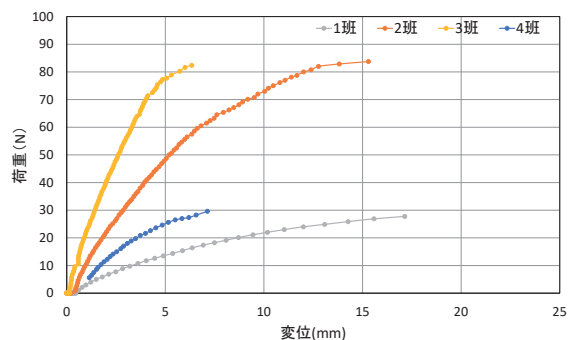


図10 荷重変位曲線

表4 事前計算と試験結果

班区分	最大荷重 (N)	応力の種類 (上段：計算／下段：試験)		
		部材 A	部材 B	部材 C
1 班	34.3	引張	圧縮	引張
		引張	圧縮	引張
2 班	83.7	圧縮	圧縮	引張
		圧縮	圧縮	引張
3 班	82.3	圧縮	圧縮	引張
		圧縮	圧縮	引張
4 班	29.6	引張	圧縮	引張
		引張	圧縮	引張

## VII 考察

これまで当科の実施事例を紹介してきたが、教育訓練効果の観点から次の項目について現状の課題や今後の展望を踏まえて考察する。

### 1 実施方法について

本事例ではIV章で記したとおりトラスの応力計算を扱っており、実習内で講義を実施しているが、履修科目とのつながりに重きを置く場合は、実施時期の調整が重要となるだろう。しかしながら既存のカリキュラム体系を調整することは容易ではないと察する。

そこで、選択科目による実施の可能性にも注目しておきたい。ここでは選択科目を「教育訓練効果の観点から必要に応じて設定できる科目」と定義しておくが、関連科目を一通り履修させた後に、選択科目で本事例のような実習を用意しておくことで、他施設での展開も期待できると考える。

### 2 使用材料について

模型に使用する材料は、建築模型等で使われているスチレンボードを採用している。スチレンボードの接着には専用ノリを用いるが、この扱いには注意が必要である。面同士の接着は比較的時間を要さないが、部材の継ぎ足しや、角度を持って接合させる場合にはある程度の時間を要する。また、使用量も接着時間に影響を及ぼすようである。したがって、模型形状によっては接着が不十分な場合も発生するため、使用材料の特性を十分に理解しておく必要がある。多めに使用すれば接着強度が得られるという考えだけで製作していると、乾燥時間を読み誤り、載荷試験時に接合部から壊れてしまう事態になりかねない。これはこれで接合部の先行破壊の不具合を知る機会になるが、本来の目的ではない点から考えると具合が悪い。

他方で、十分に接着した模型で載荷試験をすれば圧縮が作用する部材は弓なりにたわむ。図 11 は 3 班の載荷試験後の状態であるが、事前計算の結果のとおり部材 A に圧縮が作用し、座屈現象を確認することができた事例である。

式(1)は構造力学で学ぶオイラーの座屈式であるが、部材が長いほど座屈しやすいことを意味する。その他、材料固有の係数も含まれているため、この式を用いて座屈を説明したい場合は、別途手順を踏むようにした方が良好だろう。スチレンボードを用いた載荷試験は、現象の可視化がしやすいため、前提知識を要さず学習できる

点で、初学者には有効な教材だと考える。しかしながら、接着時間の確保には工夫を要する点に注意したい。

$$N_k = \frac{\pi^2 EI}{\ell_k^2} \dots (1)$$

$N_k$  : 座屈荷重(N)

$E$  : 弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)

$I$  : 断面二次モーメント(mm<sup>4</sup>)

$\ell_k$  : 座屈長さ(mm)

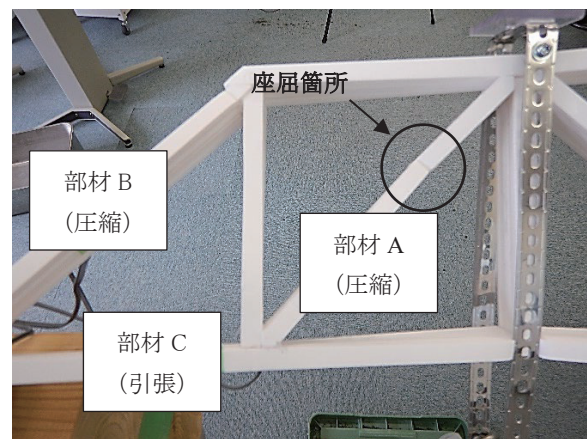


図 11 圧縮による座屈事例(台形トラス(3 班))

### 3 試験方法について

載荷試験中に荷重変位曲線(図 10)を表示するためには、模型と容器の間にロードセルを設置する必要がある。ここで使用している機器の自重は 1231.9 g (12.1 N) あるため、設置するだけで模型に載荷することになる。模型の接着が不十分な場合はこの時点で変形が進行することもあり得るだろう。本事例の場合は、模型上部に変位計も設置するため、この影響も見逃せない。手作りの試験装置故に不便な部分を有するが、試験準備は模型に加力していることを実感する瞬間でもある。模型にロードセルと容器を吊るすことは自らの手で集中荷重を作用させる瞬間であり、つり合い状態が成立する場面を目の当たりにする瞬間でもある。模型を無事に試験装置に設置しただけで起きる歓声は少々大袈裟にも感じるが、力のつり合いに対する理解の表れなら嬉しい限りである。

載荷終了後は、容器に溜まった鉛玉の重量を計測してみるのも良いだろう。計測時の単位はグラムのため、ニュートンに換算させ、パソコン上に表示されている最大荷重値と比較すれば、単位換算の確認ができる。こういう何気ない作業の中に座学で得た知識を散りばめてお

くことも、実学融合を感じる一歩として有効だろう。

#### 4 試験結果について

載荷試験では、荷重値、変位、ひずみの結果を得るが、これを次のように取り扱うことができる。

- ① 荷重値、変位 → 荷重変位曲線 (図 10)
- ② ひずみ → 部材に作用する応力の種類 (引張、圧縮) の判別

①は、荷重と変位による仕事量 (=力×移動距離) を扱うことができる。構造設計では粘り強さの指標として扱うが、グラフの面積と関連付けるだけで専門科目とのつながりを示せる。面積の算定に積分を関連付ければ数学への展開も簡単である。②は計測値に表れる符号から応力の種類を確認し、事前計算で得た応力の種類と比較することができる。比較した内容が合致している場合は力学をより身近に感じることだろう。本事例に示す結果が冒頭に挙げた声に繋がっていることは疑う余地もない。このうち、学生が最も関心を示すのが①に含む最大荷重値であると捉えている。これを評価する判定式はいくつか考案されているが、以下にその一例を挙げる。

$$\text{判定式}^4) = 0.2 \times \text{AE} + 0.2 \times \text{SS} + 0.6 \times \text{LW} \quad \dots (2)$$

AE: 美的評価 (最もデザイン性が優れているものを参加者による投票数で評価する。AE = 得票数 / 最大得票数)

SS: 構造上の評価 (構造上の印象や概念に対して参加者による投票数で評価する。SS = 得票数 / 最大得票数)

LW: 耐荷力の重量効率 A の評価 (A 値 / 最大 A 値)

$$\text{重量効率 A} = \text{耐荷力} / \text{重量}^{1.5}$$

なお、載荷試験前には、班毎に製作模型に対して次の内容を発表させ、これを元に AE と SS を評価すると良い。

- ・ 模型形状を選んだ理由
- ・ 破壊する部分
- ・ 製作模型のアピール

当科でも式 (2) を用いて実施したが、学生からは大変好評であった。他方で、担当教員の立場から見れば、判定式にある SS について、根拠の提示がない、あるいはできない班が多いと感じる機会でもあった。その中であって、教科書にある基本的なトラスを製作し、自分達

で応力計算したものを根拠に SS を説明した班があった。載荷試験では説明通りの壊れ方となり、式 (2) による評価でも 1 位を得た。本事例がこの一件を参考にしたものであることを最後に申し添えておく。

余談ではあるが、重量効率 A について学年別対抗戦を実施した場合には、どのような結果が待ち受けているのだろうか。実習の枠を超えた取り組みが期待される。

#### VIII おわりに

図 1 の木造トラスは、2019 年度に学生を連れて株式会社トーセンを見学させていただいた際に撮影したものである。木造トラスの図面と実物を前に、構造設計の担当者から大スパン構造物の実現に向けた説明を聞いて、学生はようやくその凄さに気付いたと感想で述べている。この後に実施したトラスの載荷試験で見せた学生達のやる気は、冒頭に記した声から察していただければ幸いである。

昨今、法律改正、技術の進歩、環境問題等の背景から中大規模木造建築物が推奨されてきている。これに伴い、大スパンを実現するトラス構造への理解はこれから益々求められてくることだろう。構造分野への関心を持つきっかけは様々だと思うが、本事例もその一つとして貢献できれば幸いである。

#### IX 謝辞

株式会社トーセンの見学では、東泉社長をはじめ社員の方々から懇切丁寧な説明をいただきました。この場を借りて厚くお礼申し上げます。

#### 【参考文献】

- (1) 少年写真新聞社発行、理科教育ニュース、2008 年 No.729。
- (2) 技報堂出版株式会社発行、社団法人鋼材倶楽部鋼構造教材作成小委員会、紙模型でわかる鋼構造の基礎、2006 年、pp.30-32。
- (3) 土方勝一郎、隅澤文俊、山健二、岸田慎司、小澤雄樹、よくわかる建築構造力学 I、森北出版株式会社、2020 年、pp.111-127。
- (4) 松田浩、崎山毅ほか、構造設計製図でのブリッジコンテストの試み、長崎大学工学部研究報告、第 27 巻第 49 号、1997 年、pp.253-259。